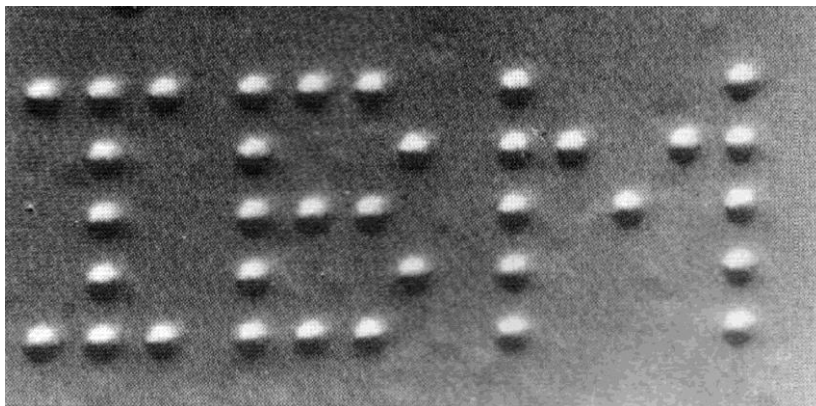




# 分子运动论

物质是由原子构成的

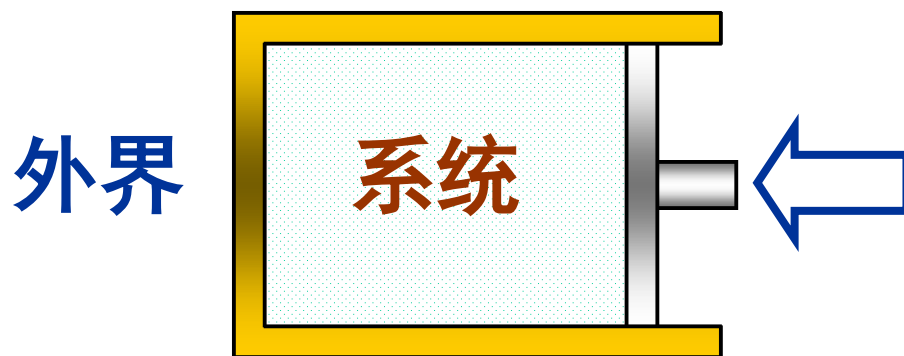


利用STM把一个个原子排列成  
**IBM** 字母的照片.



**热力学系统：** 大量分子组成的宏观物体

（气体、液体、固体）



**边界：**

导热、绝热； 可动、固定； 渗透、不可渗透



## 系统分类

孤立系统

闭系统

开放系统

单元单相系统

多元多相系统

经典系统

量子系统



## 研究对象

热现象：与温度有关的物理性质的变化.

热运动：构成宏观物体的大量微观粒子的永不休止的无规则运动.

## 研究对象特征

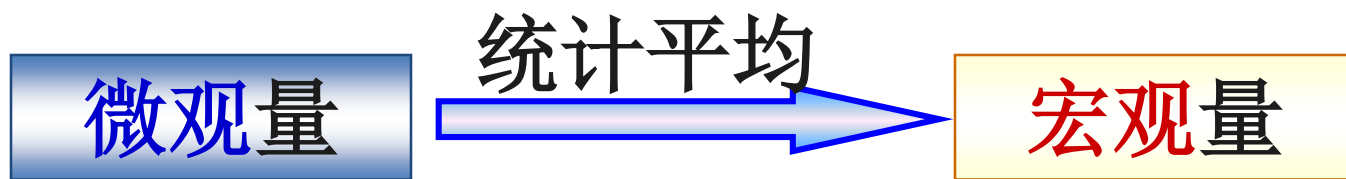
单个分子：无序、具有偶然性、遵循力学规律.

整体(大量分子)：服从统计规律.



**微观量**: 描述个别分子运动状态的物理量(不可直接测量), 如分子的 $m$ ,  $\vec{v}$  等.

**宏观量**: 表示大量分子集体特征的物理量(可直接测量), 如 $p$ ,  $V$ ,  $T$  等.





## 研究方法

1 热力学 —— 宏观描述

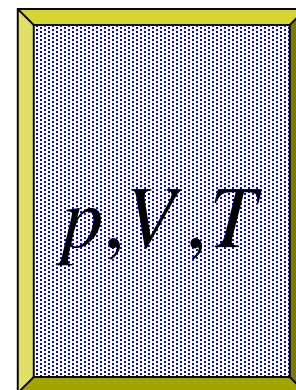
2 气体动理论 —— 微观描述



## 一 气体的物态参量(宏观量)

### 1 压强 $p$ : 力学描述

单位:  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$



标准大气压:  $45^\circ$  纬度海平面处,  $0^\circ \text{C}$  时的大气压.  $1 \text{ atm} = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$

### 2 体积 $V$ : 几何描述

单位:  $1 \text{ m}^3 = 10^3 \text{ l}$



## 3 温度 $T$ : 热学描述

单位: K(开尔文).

$$T = 273 + t$$

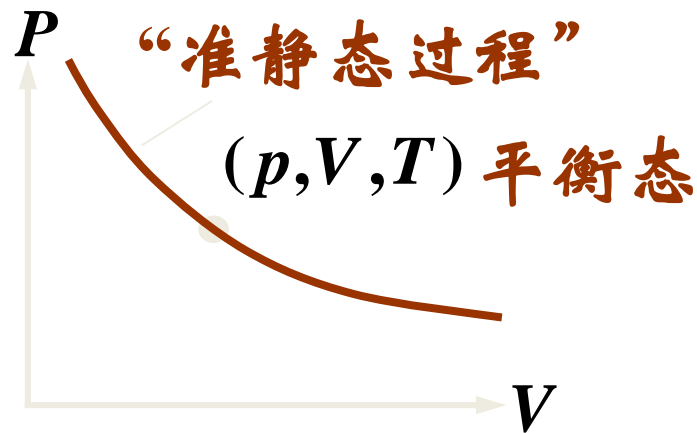
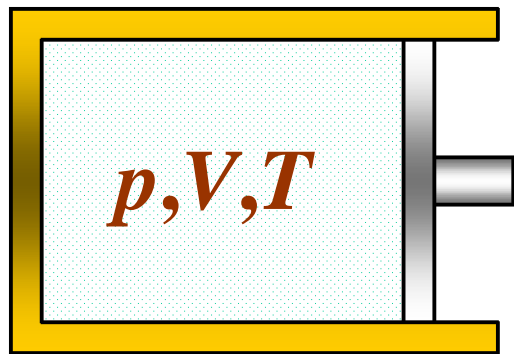
## 二 平衡态

一定量的气体, 在不受外界的影响下, 经过一定的时间, 系统达到一个稳定的宏观性质不随时间变化的状态称为平衡态.





## 平衡态可以用宏观参量描述



**准静态过程：** 每一时刻系统都无限接近于平衡态的过程。

对 “无限缓慢” 的实际过程的近似描述。



## 准静态过程/平衡过程：多方过程

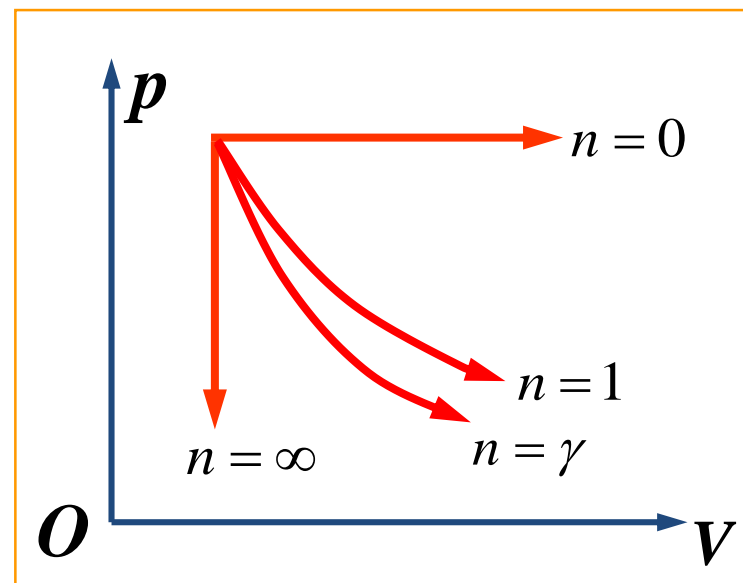
$$pV^n = \text{常量}$$

等压过程：  $dp = 0$        $n = 0$

等体过程：  $dV = 0$        $n \rightarrow \infty$

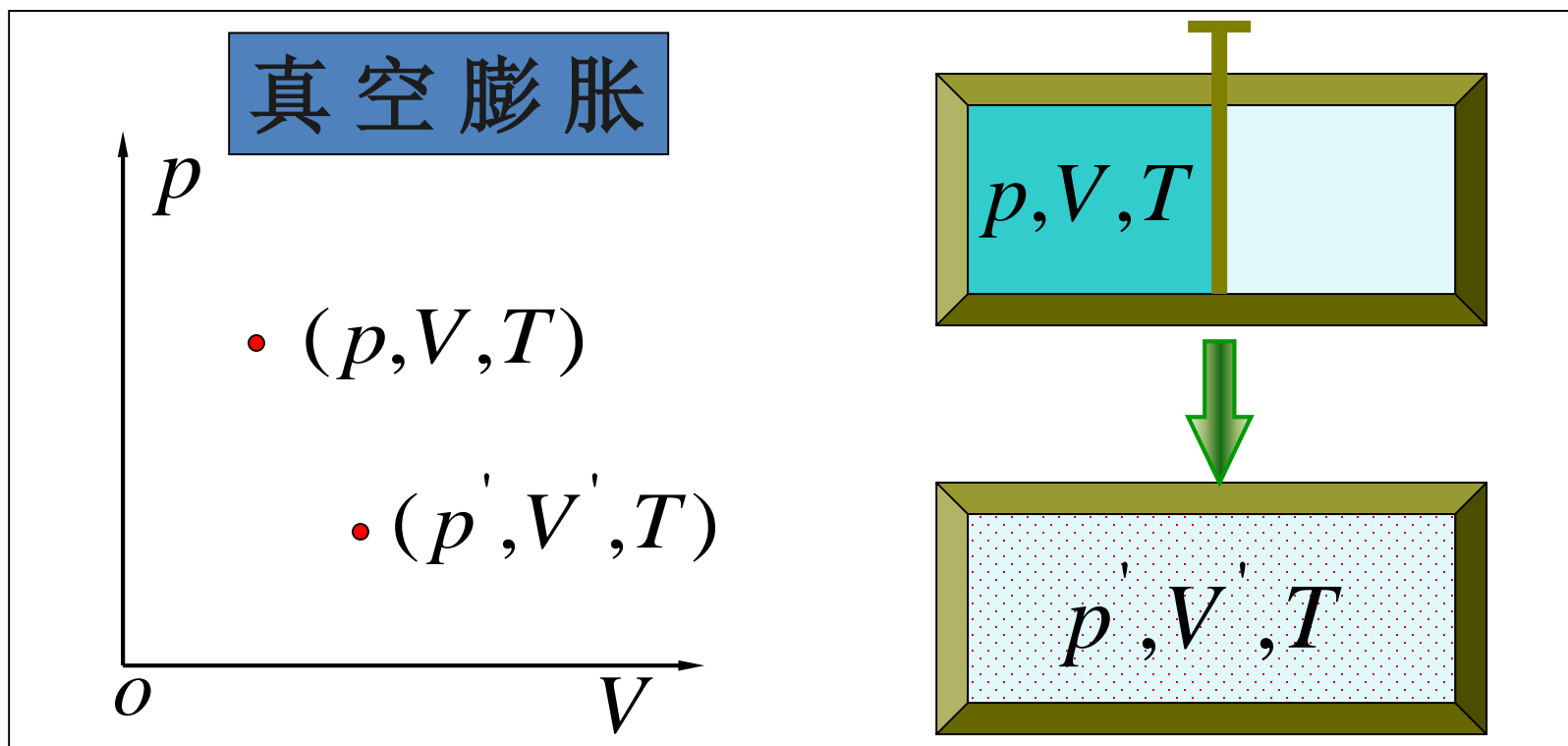
等温过程：  $dT = 0$        $n = 1$

绝热过程：  $Q = 0$        $n = \gamma$



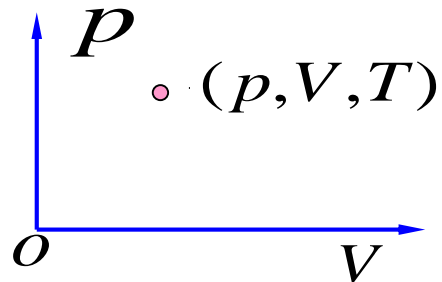
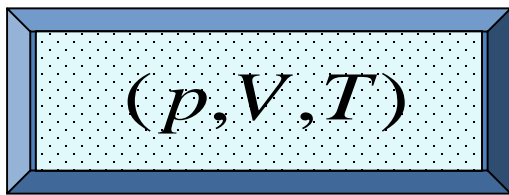


## 非准静态过程：绝热自由膨胀过程





## 平衡态的特点



- (1) 单一性 ( $p$ ,  $T$  处处相等);
- (2) 物态的稳定性——与时间无关;
- (3) 自发过程的终点;
- (4) 热动平衡(有别于力平衡).



### 三 理想气体物态方程

理想气体宏观定义：

遵守三个实验定律的气体.

物态方程：理想气体平衡态宏观参量间的函数关系 .



## 12-1 平衡态 理想气体物态方程 热力学第零定律

对一定质量的  
同种气体

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

理想气体物  
态方程一

$$pV = \nu RT = \frac{m'}{M} RT$$

摩尔气体常量

$$R = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$m'$  系统总质量,  $M$  摩尔质量,  $m$  单个分子质量



## 12-1 平衡态 理想气体物态方程 热力学第零定律

$$m' = Nm \quad M = N_A m$$

理想气体物  
态方程二

$$p = nkT$$

$$k = R / N_A = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

$k$  称为玻耳兹曼常量.

$n = N/V$ , 为气体分子数密度.



## 四 热力学第零定律

如果物体 **A** 和 **B** 分别与物体 **C** 处于热平衡的状态，那么 **A** 和 **B** 之间也处于热平衡。





### 一 分子的线度和分子力

分子有单原子分子、双原子分子、多原子分子和千万个原子构成的高分子。

不同结构的分子其尺度不一样

**例** 标准状态氧分子

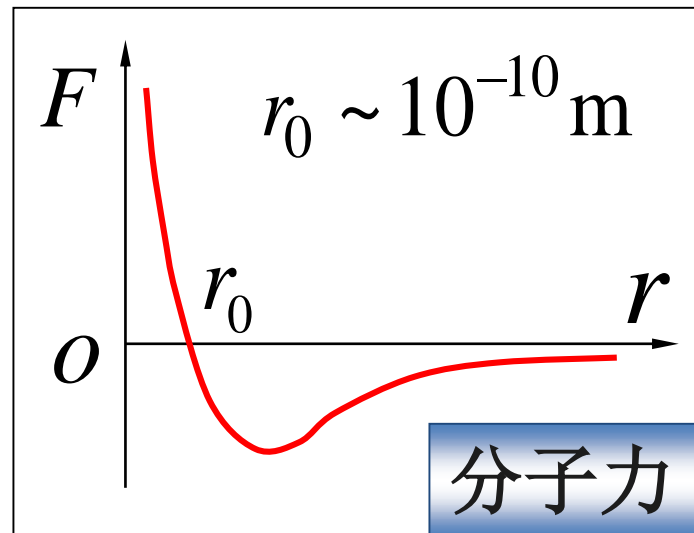
直径  $d \approx 4 \times 10^{-10} \text{ m}$

$$\frac{\text{分子间距}}{\text{分子线度}} \approx 10$$



### 二 分子力

当  $r < r_0$  时，分子力主要表现为斥力；当  $r > r_0$  时，分子力主要表现为引力。  $r \rightarrow 10^{-9} \text{ m}$  时  $F \rightarrow 0$





### 三 分子热运动的无序性及统计规律

热运动：大量实验事实表明分子都在作永不停止的无规运动。

**例** 常温和常压下的氧分子

$$\bar{v} \cong 450 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\bar{\lambda} \sim 10^{-7} \text{ m} \quad \bar{z} \sim 10^{10} \text{ s}^{-1}$$



### 一 理想气体的微观模型

- (1) 分子可视为质点； 线度  $d \approx 10^{-10} \text{ m}$   
间距  $r \approx 10^{-9} \text{ m}$  ,  $d \ll r$  ；
- (2) 除碰撞瞬间， 分子间无相互作用力；
- (3) 弹性质点（碰撞均为完全弹性碰撞）；
- (4) 分子的运动遵从经典力学的规律。

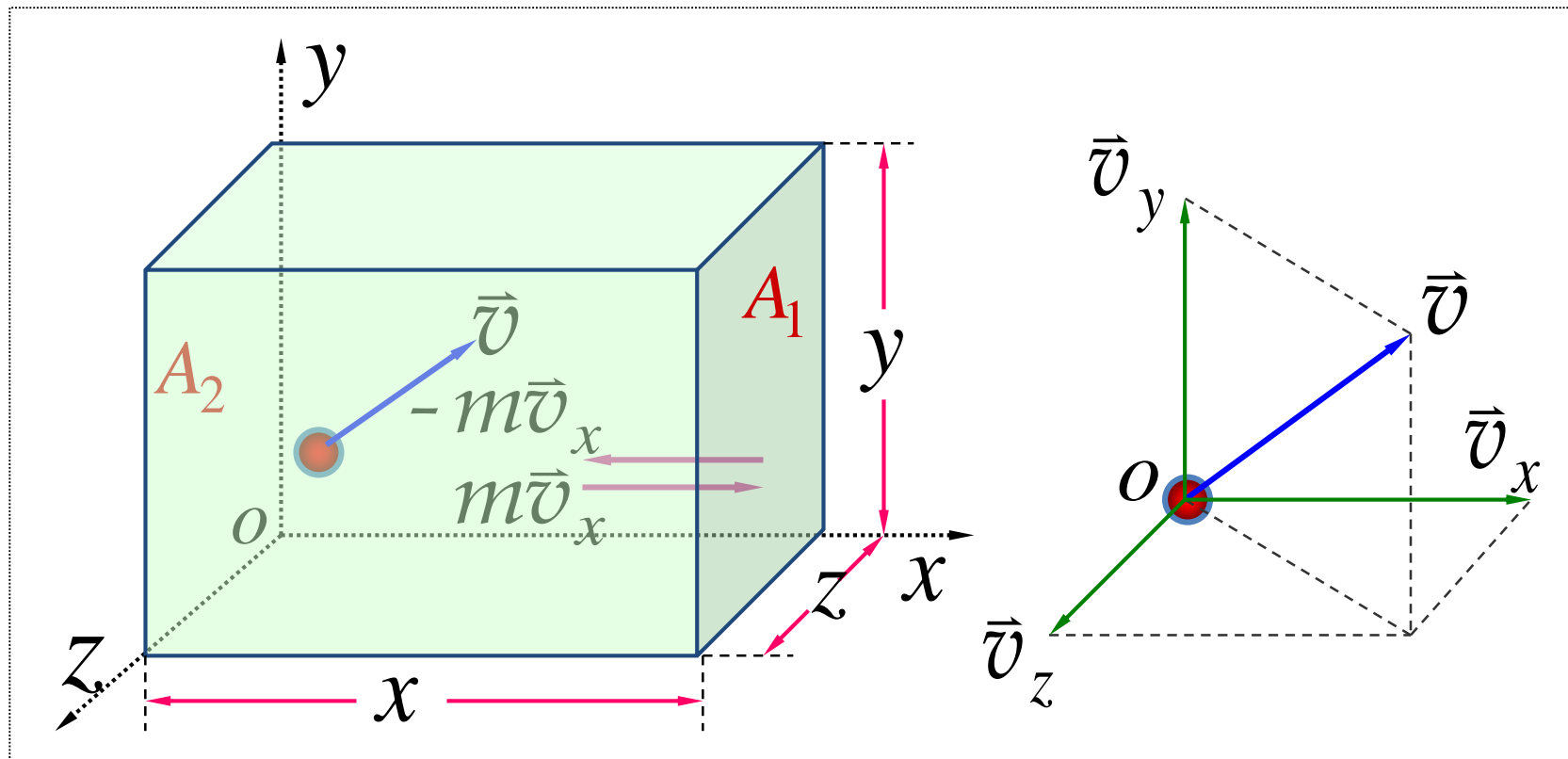


### 二 理想气体压强公式

设边长分别为  $x$ 、 $y$  及  $z$  的长方体中有  $N$  个全同的质量为  $m$  的气体分子，计算  $A_1$  壁面所受压强。



## 12-3 理想气体的压强公式





单个分子碰撞特性：偶然性、不连续性.

大量分子碰撞的总效果：恒定的、持续的力的作用.

热动平衡的统计规律（平衡态）

(1) 分子按位置的分布是均匀的.

$$n = \frac{dN}{dV} = \frac{N}{V}$$



(2) 分子各方向运动概率均等.

分子运动速度  $\vec{v}_i = v_{ix}\vec{i} + v_{iy}\vec{j} + v_{iz}\vec{k}$

各方向运动概率均等  $\overline{v_x} = \overline{v_y} = \overline{v_z} = 0$

$x$  方向速度平方的平均值  $\overline{v_x^2} = \frac{1}{N} \sum_i v_{ix}^2$

各方向运动概率均等  $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$





◆ 单个分子遵循力学规律.

$x$ 方向动量变化:  $\Delta p_{ix} = -2mv_{ix}$

两次碰撞间隔时间:

$$\Delta t = 2x/v_{ix}$$

单个分子单位时间  
施于器壁的冲量,  
即对器壁的作用力:

$$f = -\frac{\Delta p_x}{\Delta t} = \frac{mv_{ix}^2}{x}$$



### ◆ 大量分子总效应

单位时间  $N$  个粒子对器壁总冲量:

$$\sum_i \frac{mv_{ix}^2}{x} = \frac{m}{x} \sum_i v_{ix}^2 = \frac{Nm}{x} \sum_i \frac{v_{ix}^2}{N} = \frac{Nm}{x} \overline{v_x^2}$$

器壁 $A_1$  所受平均冲力:  $\overline{F} = \overline{v_x^2} Nm/x$



## 12-3 理想气体的压强公式

气体压强

$$p = \frac{\bar{F}}{yz} = \frac{Nm}{xyz} \overline{v_x^2}$$

统计规律

$$n = \frac{N}{xyz} \quad \overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$$

分子平均平动动能

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{1}{2} m \overline{v^2}$$

气体压强公式

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon}_k$$



### 压强的物理意义

统计关系式



$$p = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon}_k$$

宏观可测量量

微观量的统计平均值

思考：

为何在推导气体压强公式时不考虑分子间的相互碰撞？





## 12-4 理想气体分子平均平动动能与温度的关系

理想气体压强公式  $p = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon}_k$

理想气体物态方程  $p = nkT$

分子平均平动动能:

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$$

微观量的统计平均

宏观可测量量



## 12-4 理想气体分子平均平动动能与温度的关系

温度  $T$  的物理意义

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$$

(1) 温度是分子平均平动动能的量度.

$$\bar{\varepsilon}_k \propto T$$

(2) 温度是大量分子的集体表现.

(3) 温度所反映的是分子的无规则运动, 它和物体的整体运动无关,



### 讨论

**1** 一瓶氢气和一瓶氮气密度相同，分子平均平动动能相同，而且都处于平衡状态，则：

(A) 温度相同、压强相同.

(B) 温度、压强都不同.

 (C) 温度相同，氢气压强大于氮气压强.

(D) 温度相同，氢气压强小于氮气压强.

**解**

$$p = nkT = \frac{N}{V} kT = \rho \frac{k}{m} T$$



## 12-4 理想气体分子平均平动动能与温度的关系

2 理想气体体积为  $V$ ，压强为  $p$ ，温度为  $T$ 。一个分子的质量为  $m$ ， $k$  为玻耳兹曼常量， $R$  为摩尔气体常量，则该理想气体的分子数为：

(A)  $pV/m$        (B)  $pV/(kT)$

(C)  $pV/(RT)$       (D)  $pV/(mT)$

解  $p = nkT$        $N = nV = \frac{pV}{kT}$





## 12-4 理想气体分子平均平动动能与温度的关系

**例题: 1 mol 标准状况下的空气**

**例题: 恒温气压随高度的变化**

